

Ensayo no destructivo de soldaduras en pernos conectores mediante inspección acústica

Non-destructive assessment of welded headed studs by acoustic test

A. Aznar ^(*), J. Cervera ^(*), J. Ortiz ^(*), J. I. Hernando ^(*)

RESUMEN

Los pernos conectores aportan múltiples ventajas de uso, entre las que se encuentra el elevado margen de seguridad que ofrecen sus soldaduras ejecutadas mediante arco eléctrico. Estas soldaduras, aunque ampliamente fiables, son difícilmente comprobadas mediante ensayos no destructivos.

El presente estudio plantea la inspección de soldaduras de pernos conectores mediante su espectro acústico. Analíticamente, la investigación se ha centrado en el cálculo de los primeros modos propios de vibración. Experimentalmente se han medido las frecuencias propias de resonancia de 28 pernos, en los que posteriormente se han llevado a cabo ensayos tanto no destructivos como destructivos.

Se ha obtenido, tanto teórica como experimentalmente, una relación entre la frecuencia de vibración de los pernos conectores y la calidad de la soldadura. Por ello se verifica la posibilidad de inspección de estas soldaduras mediante un ensayo acústico con el que es posible detectar los defectos internos donde los métodos convencionales resultan inviables.

462-9

Palabras clave: Inspección; soldadura; perno conector; acústica; ensayo no destructivo.

SUMMARY

Headed studs are nowadays the standard steel-concrete connectors because of their competitive advantages. Firstly, they provide a high degree of safety thanks to semiautomatic electric arc welding. These welds are not suitable for typical non-destructive tests.

The analytical study comprises several models. The first vibration modes have been obtained. The experimental research has developed first the measurement of the natural frequencies of 28 headed-studs in the sonic range. Then they have been tested by non-destructive and destructive tests. Finally their tests have been compared with their respective frequency measurements.

A clear relationship between the measured frequencies and the lack of penetration of the welds has been established, that confirms the analytical prediction of this effect of the internal weld imperfections.

Therefore, the feasibility of simple and absolutely non-destructive tests of welded studs by in site measurement of natural frequencies in the sonic range has been clearly established in this work.

Keywords: Inspection; welds; headed stud; acoustic; sonic; non destructive test.

^(*) Escuela Técnica Superior de Arquitectos de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid (España).
Persona de contacto/Corresponding author: antonio.aznar@upm.es (Antonio Aznar).

1. INTRODUCCIÓN

Los pernos conectores (*headed studs*) son ampliamente utilizados tanto en el campo de las estructuras de edificación como de obra civil. Existe una amplia gama disponible en el mercado donde varía, principalmente, su longitud y diámetro. Su uso aporta grandes ventajas en la construcción (elevada resistencia, precisión, rapidez de montaje, etc.) donde es de destacar el elevado grado de fiabilidad que ofrecen sus soldaduras, ejecutadas de forma semiautomática mediante arco eléctrico.

Esta técnica de soldeo consiste en establecer un intenso arco eléctrico entre el conector y el perfil base (en el caso general el conector es soldado contra una "placa base") que funde las superficies de contacto resultando solidificados perfil y anclaje solidariamente sin material de aportación. El tiempo del soldeo y la corriente están pre-configurados para adecuarse a las dimensiones del perfil base y al diámetro del perno. La duración del arco eléctrico varía entre 0,1 y 1 segundo, es decir, un bajo tiempo total de soldadura y una elevada productividad. En el corto tiempo que el baño de soldadura permanece fundido es protegido de la influencia atmosférica mediante un anillo cerámico o, en casos excepcionales, por un flujo de gas inerte, creando un cordón de soldadura limpio y uniforme. Al extinguirse el arco de soldadura la pistola presiona el perno sobre el perfil base, sumergiéndolo en el baño, lo que da forma al anillo de soldadura.

Ante las múltiples ventajas aportadas se encuentra la considerable desventaja de su dificultad de inspección, al no ser efectivos los ensayos no destructivos convencionales.

Los defectos de soldadura que se pueden producir se resumen en:

- **Falta de fusión o de penetración:** Se agrupan ambas deficiencias puesto que en las soldaduras mecánicas mediante pistola por arco eléctrico el efecto coincide. Se debe a un error en la calibración de las variables *potencia/tiempo* del equipo. El defecto producido generalmente es reducido y concéntrico. Produce una reducción de resistencia en la soldadura, proporcional a la superficie sin soldar.
- **Porosidad:** Debida a una presencia de humedad en la base del perno o en la placa base. Se forma por aparición de moléculas de hidrógeno resultantes de la disociación de las moléculas de agua por el calor producido durante el proceso de soldado. El resultado es la aparición de pequeñas oquedades en la superficie de contacto entre el perno y placa base. Produce una reducción en la

resistencia de la soldadura y una posible fragilización, proporcional al número y tamaño de las oquedades.

- **Impurezas:** El defecto se produce en los casos con limpieza insuficiente de las superficies de contacto. Produce una soldadura heterogénea y generalmente una reducción de resistencia, en relación a la cantidad de impurezas y a la naturaleza de las mismas.

Los ensayos no destructivos convencionales generalmente son idóneos para la inspección de soldaduras puesto que permiten la detección de los posibles defectos con una agresividad mínima. Lamentablemente resulta inviables en los pernos conectores por diversos motivos. Los ensayos no destructivos habituales en soldaduras junto con la razón de su inviabilidad de ejecución en este tipo de piezas se resumen a continuación:

- **Inspección visual (VT).** Esta se debe realizar a lo largo de todo el proceso de ejecución, desde la recepción de los materiales hasta la inspección de la soldadura, según la EN 970:1997 (1). Se trata de una inspección útil pero de baja fiabilidad. Generalmente, dependiendo de la gravedad del defecto, éste puede resultar embebido en la zona central de la soldadura, por lo que no es detectable mediante inspección visual. A pesar de ello, debe realizarse siempre, incluso cuando está prevista la ejecución de otro tipo de ensayos, puesto que los defectos graves generalmente sí resultan reflejados al exterior mediante una discontinuidad en el anillo de soldadura.
- **Líquidos penetrantes (PT).** Se basa en la penetración por capilaridad de un líquido que muestra los defectos superficiales tras la posterior aplicación de un revelador. Pese a tratarse de un ensayo altamente eficaz en soldaduras continuas, en los pernos conectores resulta inadecuado. Esto es así por detectar únicamente los defectos superficiales y, como se ha comentado anteriormente, éstos no se presentan en la superficie exterior del perno hasta un alto grado de defecto (momento en el que se detectan mediante inspección visual, más económica y de carácter obligatorio).
- **Partículas magnéticas (MT).** Su realización es posible por las propiedades magnéticas de atracción entre metales de ciertos materiales como el acero. Las pequeñas partículas magnéticas son atraídas por los polos y de esta forma muestran las discontinuidades superficiales o inmediatamente sub-superficiales en piezas de geometría relativamente uniforme. Resulta inviable en los perfiles con pernos conectores por el tamaño y geometría de las piezas y por la incompatibilidad debida a la ubicación del defecto.

- **La inspección por ultrasonidos (UT).**

Se basa en la propagación de las ondas a través del material, pudiendo detectar defectos tanto superficiales como internos debidos a la reflexión, refracción o distorsión producida por la onda ante ellos. Los defectos resultan perceptibles mediante una variación de intensidad o dirección. Resultan altamente eficaces en casi todo tipo de piezas aunque lamentablemente en los perfiles con pernos resultan inviables por su geometría.

- **La inspección radiográfica (RT).** Procede de la irradiación de las piezas con pernos mediante Rayos X con el fin de plasmar en la película radiográfica irregularidades internas mediante variaciones de intensidad de radiación. Resulta inviable al intentar inspeccionar la superficie de contacto entre elementos de muy diferente espesor. Al situarse el posible defecto de soldadura junto a un espesor considerable (como el ala del perfil), éste resulta inapreciable. De forma adicional presenta el obvio inconveniente de la contaminación radiactiva, lo que dificulta enormemente su ejecución en obra.

Aparte de los ensayos no destructivos anteriores comienza a abrirse paso la utilización de las señales acústicas en detección de discontinuidades (2). Aunque no se ha aplicado directamente al campo de las soldaduras, recientes investigaciones (3) (4) señalan una relación directa entre la ejecución de soldaduras y el espectro acústico respuesta, llegando a poder evaluar la estabilidad del proceso de soldado. Por otro lado, es conocido entre los soldadores especializados el uso de la combinación visual y acústica durante el proceso de soldadura, en provecho de ejecución y evaluación de la misma. Con estas premisas se plantea la inspección de soldaduras en pernos conectores mediante su espectro acústico, proceso que comienza con el cálculo de los modos propios de vibración de la pieza a inspeccionar.

2. APROXIMACIÓN ANALÍTICA TEÓRICA

Se realizó una primera aproximación modelizando un perno como elemento cilíndrico, continuo y homogéneo. Se incorporaron las características mecánicas del acero: $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/mm}^2$ y $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; con unas dimensiones geométricas de $L = 0,1 \text{ m}$ y $\phi = 0,01 \text{ m}$. Mediante la expresión teórica [1], correspondiente a una ménsula de sección constante rígidamente empotrada, se obtiene una frecuencia de vibración de 724,4 Hz.

$$[1] \quad f_n = \frac{3,52}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}$$

Siendo:

$$I = \pi \phi^4 / 64$$

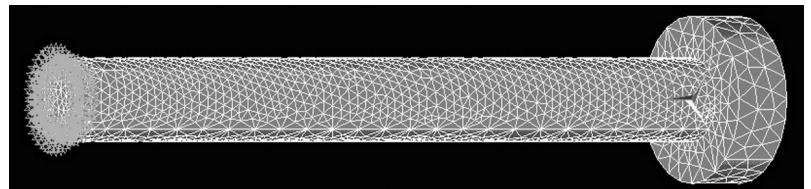
$$A = \pi \phi^2 / 4$$

2.1. Análisis modal

Determinar los modos propios de vibración no resulta sencillo de forma manual en geometrías complejas. El análisis se complica al considerar la geometría en 3-D y resulta especialmente difícil incorporar las "condiciones adicionales" que simulen los defectos de soldadura.

Con el cálculo modal mediante elementos finitos se pueden obtener eficazmente las diferentes frecuencias propias de vibración en pernos modelizados tridimensionalmente. Se ha desarrollado un modelo mediante Ansys con el proceso que se resume a continuación:

- Se introduce la geometría "real" en tres dimensiones, mediante la unión boleana de dos cilindros como fuste y cabeza del perno.
- Se opta por el elemento *solid187* introduciendo las propiedades mecánicas de $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0,3$ y $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.
- Se realiza un mallado tetraédrico obtenido de la distribución regular desde la superficie de soldadura con una distancia máxima de separación de 1mm entre nodos.
- Se introducen las condiciones de contorno: sobre la superficie de unión del perno a la chapa base se impiden los tres movimientos y tres giros en la totalidad de los nodos.
- Por último se ejecuta el cálculo modal. En la Figura 1 se puede observar el modelo estudiado.



1

Los resultados obtenidos mediante este procedimiento son un primer modo múltiple de vibración de 548,2 Hz y un segundo modo múltiple de 3730 Hz, ambos con un factor de multiplicidad de 2. Lógicamente el valor de la frecuencia fundamental es más preciso que el obtenido mediante la fórmula [1] que sirve únicamente de control aproximado. Dicha fórmula teórica no recoge el incremento de masa debido a la cabeza del perno, que al no incrementar su rigidez efectiva pero sí su masa, lógicamente debe reducir la frecuencia propia.

La explicación a la multiplicidad de los modos se encuentra en la tridimensionalidad del modelo y en su simetría axial: ésta produce una degeneración de los autovalores, cuyos subespacios de estados propios necesariamente tienen una dimensión no inferior a dos.

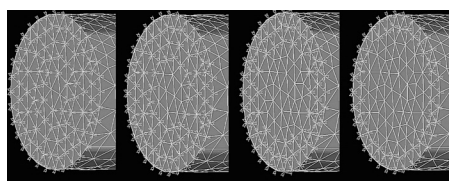
1. Modelización mediante Ansys de un perno conector 100ø10.

2. Reducción de condición de empotramiento por anillos de nodos.

2.1.1. Cálculo con soldaduras defectuosas

Realizado el modelo resulta sencillo incorporar los defectos de soldadura. Los defectos de falta de penetración, falta de fusión y porosidad se traducen en la aparición de “huecos” en la superficie de contacto entre la base del perno con el perfil. Esta heterogeneidad se traduce en la reducción parcial o total de continuidad entre elementos de dicha zona, lo que implica una independencia de los estados tensionales entre los puntos separados por dichos “huecos”. Por ello parece razonable llevar a cabo la modelización de estos defectos mediante la interrupción de la continuidad de las tensiones en puntos determinados y ello se obtiene al eliminar las coacciones en ciertos nodos, de modo que se simulan dichos “huecos”.

El defecto de presencia de impurezas implica igualmente una reducción en la resistencia, pero con mayor dificultad de modelización. Esto es así debido a la incertidumbre derivada de la naturaleza de las impurezas y su efecto. Por ello el presente artículo se ha limitado a la modelización de defectos más cercanos a la porosidad, falta de fusión y de penetración, que representan una aproximación razonable para los más habituales en pernos conectores. Así se ha procedido a la reducción gradual de coacciones en los nodos pertenecientes a la superficie de la soldadura. Se establecido un patrón regular en el proceso de eliminación de coacciones de los nodos, procediendo de forma anular desde el centro hacia el exterior, como se puede observar en la Figura 2.



2

Se han analizado seis hipótesis, desde la condición de soldadura perfecta (100%), donde ninguna coacción ha sido modificada, hasta la soldadura interiormente defectuosa excepto en su perímetro exterior (30,5%). Se han calculado los cuatro primeros modos propios para las hipótesis planteadas, de los que han resultado un primer y segundo modo ambos múltiples (Tabla 1).

Adicionalmente se ha llevado a cabo una aleatoria eliminación progresiva de coacciones (sin patrón definido), quizás más próxima a la respuesta producida por los defectos de impurezas.

Analizando los resultados obtenidos se observan dos conclusiones interesantes y ampliamente satisfactorias para la identificación de la calidad de soldaduras mediante su respuesta acústica:

- Con una mínima proporción de nodos sin condición de continuidad perfecta se reduce notablemente la frecuencia de resonancia obtenida.
- La frecuencia obtenida es principalmente debida al número de nodos afectados, variando con menor relevancia la ubicación de los mismos.

Tras el análisis de los resultados resumidos en la tabla 1 y en las gráficas de la Figura 3 se observa la reducción de frecuencias en función del porcentaje de nodos con condición de coacción perfecta. Esta disminución de frecuencia se puede predecir fácilmente, puesto que las modelizaciones de defectos restan rigidez a la pieza, y ésta es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Se observa, sin resultar predecible, un primer descenso brusco de frecuencias ante la mínima alteración de los nodos de apoyo.

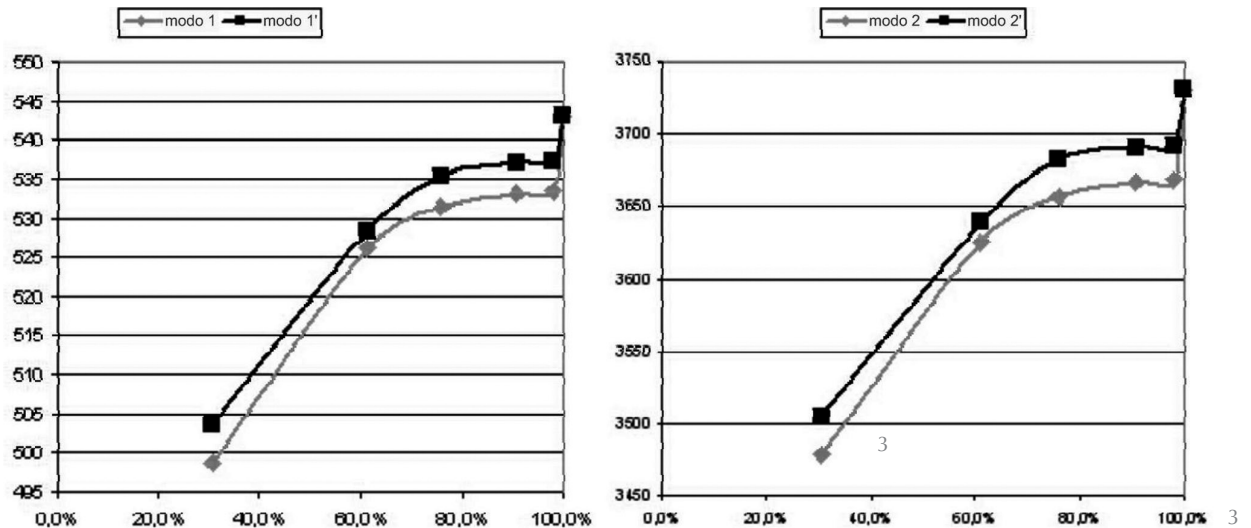
2.2. Relación acústica

Acústicamente la frecuencia de vibración está relacionada con un infrasonido, sonido ó ultrasonido. En este caso la resultante se encuentra en el espectro audible ($\approx 20\text{Hz}..20.000\text{Hz}$) y dentro de él, entre los sonidos medios ($\approx 256\text{Hz}..2000\text{Hz}$).

El sonido fruto de la vibración de un elemento está asociado a su frecuencia. Por ello las frecuencias de los modos propios anteriormente calculados, definen el sonido producido por un perno al ser excitado y, generalmente, una combinación entre ellas. A su vez la frecuencia está relacionada con el tono, siendo creciente con el aumento de la rigidez del perno. Esto permite una rápida comprobación de los cálculos anteriores, analizando con un “oído fino” el sonido resultante de la vibración del perno tras una sutil acción mecánica.

Tabla 1. Frecuencias de resonancia según porcentaje de nodos empotrados.

Porcentaje de nodos empotrados	Modo 1	Modo 1'	Modo 2	Modo 2'
100 %	542,88	542,88	3730,1	3730,1
98,1 %	533,32	537,09	3667,8	3691,8
90,7 %	533,05	536,89	3666,3	3690,7
75,9 %	531,3	535,43	3656,6	3682,5
61,1 %	526,08	528,29	3624,9	3638,2
30,5 %	498,56	503,68	3478,8	3504,6



En el caso de estos pernos la frecuencia del primer modo múltiple corresponde con un tono comprendido entre el Do y Do# de la octava central de la escala musical. De la amplia gama de pernos disponible en el mercado cabe destacar que sus frecuencias propias se encuentran en el espectro audible, por lo que el presente estudio es válido para todos ellos. Sus frecuencias, y por tanto la tonalidad de su sonido, se reducen al disminuir su rigidez produciendo un tono asociado más grave. La rigidez se puede reducir geométrica y materialmente (aumentando su longitud, disminuyendo su sección, módulo de elasticidad, etc.), pero también mediante la aparición de defectos de soldadura. Por ello se plantea la hipótesis de poder detectar un defecto en soldaduras mediante el sonido producido tras un golpe sutil.

Se han estudiado analíticamente gran número de pernos conectores con diferentes longitudes y diámetros. Los resultados se han centrado en los de dimensiones $L=0,1\text{ m}$ y $\phi=0,01\text{ m}$, que posteriormente se han ensayado de forma experimental en el laboratorio permitiendo su comparación. Las reducidas variaciones numéricas observadas entre los dos primeros modos múltiples y los dos segundos, se observan también entre las animaciones (Figura 4) revelando la simetría de vibración.

3. ENSAYOS EN LABORATORIO

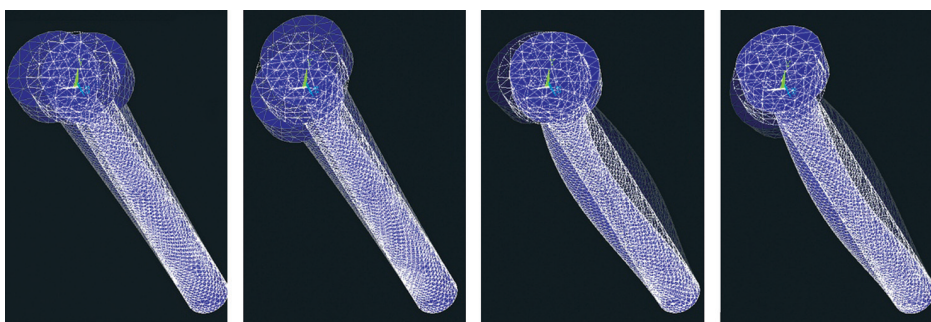
Con el fin de comprobar la hipótesis de poder inspeccionar el estado tanto interno como externo de las soldaduras mediante su ensayo acústico, concretado en este caso a los pernos conectores, se han realizado las mediciones de frecuencia propia de resonancia. Adicionalmente se han llevado a cabo los ensayos más habituales de comprobación de soldaduras en pernos conectores (destructivos y no destructivos), con la intención de comparar los resultados con los obtenidos mediante la inspección acústica.

Se han preparado un total de 7 piezas (nombradas de la A a la G) con cuatro pernos soldados cada una, formando un total de 28 probetas de pernos. Los pernos son Köco de acero St37-3k y una resistencia característica mecánicas de $f_{uk} \geq 450\text{ N/mm}^2$ y $f_{yk} \geq 350\text{ N/mm}^2$. Todos los pernos son de las mismas dimensiones, $L=100\text{ mm}$ y $\phi=10\text{ mm}$, soldados mediante arco eléctrico por pistola contra perfiles HEB-140.

De las siete piezas solicitadas, se encargó que seis de ellas fueran ejecutadas incorrectamente. Se aplicó una defectuosa calibración Potencia/Tiempo en el equipo de soldadura en los pernos de todas las piezas excepto la E, y adicionalmente el defecto de falta de limpieza previa de la superficie de soldadura a la pieza A.

3. Gráficas de relación Frecuencias de resonancia / Porcentaje de nodos empotrados.

4. 1, 1', 2 y 2' modos de vibración obtenidos mediante Ansys.



5. Aislamiento de vibración del perfil mediante cuñas de madera.

6. Esquema del ensayo acústico. Obtención de la frecuencia propia.

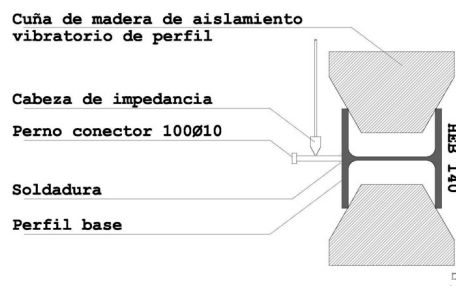
3.1. Inspección visual

En primer lugar se documentó la apariencia de las soldaduras mediante su inspección visual y se detectaron ligeras discontinuidades en el anillo de soldadura de las trece probetas denominadas A3, A4, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D2, F1, F2, F3 y F4. El resto de soldaduras mostraban un anillo correcto. De acuerdo a la normativa Structural Welding Code (5), se debe proceder a un ensayo de doblado con los pernos que no muestren una homogeneidad y continuidad en los 360° del anillo de su soldadura.

3.2. Ensayo acústico

La medición acústica se presenta como nueva posibilidad de ensayo no destructivo de soldaduras. Ante la carencia de protocolos y procedimientos específicos se establecen unas pautas de ejecución que se consideran razonables. En principio podría ser utilizado cualquier aparato de media acústica capaz de captar la frecuencia de resonancia. En el presente artículo se ha llevado a cabo mediante una cabeza de impedancia conectada a un pulse excitador-analizador Brüel&Kjaer 3560C. Existe una amplia gama de aparatos acústicos disponibles en el mercado, habiendo incluso modelos que permiten su uso a pie de obra, debido principalmente a sus dimensiones y manejabilidad.

El presente ensayo se llevó a cabo en el departamento de Física Aplicada de la E.T.S. de Arquitectura de Madrid, donde se midieron las frecuencias propias de resonancia acústica de todas las probetas. El principal problema que aparece es la influencia la vibración del perfil base en la medición del perno, la cual altera la medición "pura" del perno. Para evitar este problema se fabricaron unas cuñas de madera que se acoplaron entre las alas de perfil evitando así su vibración (Figura 5). Dada la gran diferencia de masa entre el perfil (por pequeña que sea su longitud) y el perno objeto de la medición,



este procedimiento resulta adecuado por su facilidad de medición de pernos en perfiles abiertos tipo IPE, HEB, etc.

El procedimiento de ensayo se puede observar en la Figura 6. Tal como se ha resumido en el apartado analítico, las frecuencias propias conllevan asociadas un tono específico. Por ello parece que cualquier aparato de medición, tanto de frecuencias como de tonos, sería válido siempre que éste abarque el rango de frecuencia propias de la pieza a inspeccionar y la suficiente precisión.

La medida acústica se tomó por triplicado en el punto central de cada perno. Como valor de medición se tomó la frecuencia media de dichos valores. Cabe destacar que, en la mayoría de las mediciones, los tres valores obtenidos coinciden con una exactitud de tres decimales. Esto se explica debido a que la frecuencia acústica del elemento depende de la geometría, rigidez, punto de medida y dirección de excitación, de ahí la coincidencia de los valores.

Como resultado de las mediciones se obtuvieron valores entre 496,25Hz y 536,25Hz con una media de 522,4Hz y una desviación estándar de 12,44. La primera observación destacable es la diferencia de 20,98Hz entre las medias de las soldaduras visualmente correctas e incorrectas, identificadas mediante la inspección visual. Las probetas de la pieza E han aportado los valores más elevados de la medición, coincidiendo con su correcta ejecución.

El descenso de 20,98Hz entre las frecuencias de la pieza E (soldadura óptima) y la pieza A (menor medición obtenida) puede revelar defectos internos de soldadura que resultan determinados cuantitativamente mediante aparatos de medida precisos. A su vez, estas reducciones de frecuencia son perceptibles por un "oído fino", lo que permite establecer un proceso sencillo, económico y rápido de preselección de pernos a ensayar cuantitativamente mediante el ensayo acústico propuesto o mediante cualquier otro que se considere apropiado. La diferencia de tono obtenida corresponde al descenso de un sonido próximo al Do# (óptima soldadura) de la quinta escala musical hasta un sonido próximo al Si de la cuarta.



3.3. Ensayo de doblado

Actualmente el ensayo de doblado es considerado uno de los más eficaces en la detección de soldaduras defectuosas de pernos conectores. Se procedió a su ejecución en las piezas C y F ambas con falta de continuidad en el anillo de soldadura. Su procedimiento se ha adaptado a la normativa Structural Welding Code (5), que especifica el doblado de 30° respecto al eje del perno en el sentido opuesto a la discontinuidad de la soldadura y su posterior doblado iterativo en sentido opuesto hasta la rotura. La probeta ensayada se considera “apta” si la fractura se produce por el fuste del perno. Por el contrario no supera el ensayo si la rotura se produce por la soldadura.

De las ocho probetas ensayadas rompieron por la soldadura las C2, C3, C4 y F2, fallando el resto por el fuste. Las soldaduras de los pernos C1, F1, F2 y F3 presentaban oculto el defecto de falta de penetración y sin embargo superaron el ensayo. En la Figura 7 se puede observar la probeta F1 durante su ensayo y su posterior modo de rotura. El C3, a pesar del reducido tamaño de su defecto, no superó el ensayo al encontrarse una pequeña imperfección en su perímetro exterior. Por ello se manifiesta la menor fiabilidad de este ensayo, dado que depende en gran medida de la geometría, tamaño y especialmente la ubicación de la imperfección. Esto parece debido a una concentración de tensiones en el área cercana a la discontinuidad de soldadura. Al aplicar este ensayo de acuerdo al S.W.C. (5), aparecen fuertes tracciones en los puntos de falta de continuidad, lo que incentiva su rotura por la soldadura, pero no se asegura como se ha podido observar con este ensayo.

3.4. Ensayo de golpeo

El presente ensayo es muy utilizado para la comprobación de pernos en vigas mixtas debido a su facilidad de ejecución en obra y es aconsejado por los principales fabricantes de pernos, a pesar de su alta agresividad.

Su procedimiento se resume en la aplicación de un impacto en la dirección y sentido de la discontinuidad de la soldadura del perno (en caso de existir). Una vez golpeado el perno no se debe doblar para intentar recuperar su posición original.

El ensayo de golpeo se llevó a cabo en los pernos B1 y B2 resistiendo satisfactoriamente. En principio el ensayo consistiría únicamente en un solo golpeo, pero ante las dudas surgidas sobre la fuerza a aplicar se decidió completar un número de golpes hasta resultar doblados casi 80°.

Posteriormente se aplicaron golpes en sentido inverso y falló de inmediato por la soldadura. Este método de ensayo aportó la ventaja de dejar al descubierto la superficie de contacto de la soldadura, por lo que se pudo observar el defecto de falta de penetración oculto en las soldaduras.

3.5. Ensayo por tracción

El ensayo a tracción se realizó en el laboratorio de Mecánica de la ETS de Arquitectura de Madrid. Se ensayaron hasta rotura las piezas A1, A2, A3 y A4 con el fin de esclarecer el grado de defecto necesario para que se produzca el fallo de la soldadura. Carece de sentido el ensayo de soldaduras correctamente ejecutadas, dado que se encuentra sobradamente demostrado que la soldadura es mas resistente que el fuste y la rotura no se producirá por ella.

Considerando la normativa existente nos encontramos con las formulaciones [2] y [3] según el American Concrete Institute (6) y el European Technical Approval (7) respectivamente. Sin aplicar coeficientes de seguridad (1,42 para ACI y 1,54 para ETA) resulta:

$$[2] \quad N = n \cdot A_{se,N} \cdot f_{uta} = 35,34 \text{ kN}$$

$$[3] \quad N_{Rk,s} = 32 \text{ kN}$$

N_{sa} ; $N_{Rk,s}$ = Resistencia a tracción del perno según ACI y ETA respectivamente (kN).

n = Número de pernos.

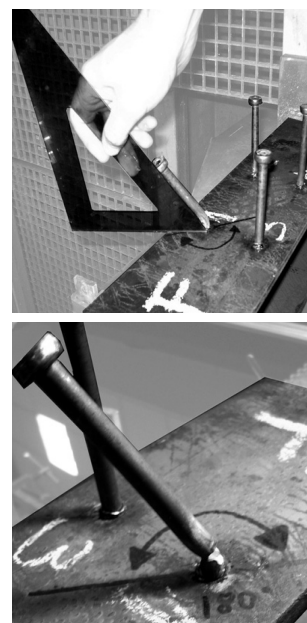
$A_{se,N}$ = Sección efectiva del perno.

f_{uta} = Resistencia última del perno (450N/mm²).

De los cuatro pernos ensayados se obtuvieron las cargas de rotura P_u detalladas en la Tabla 2. Tres de los pernos fallaron por la soldadura con una rotura frágil. Contrariamente el perno A1 falló por el fuste con una rotura dúctil. Las superficies de las probetas A2, A3 y A4 han quedado a la vista revelando un defecto de falta de penetración. Para poder observar la superficie del A1 se aplicaron golpes consecutivos e inversos en la base de la soldadura. Como resultado se observó una falta de penetración que, aunque en menor medida, predice una reducción en la resistencia de la soldadura.

En la inspección visual se había detectado una falta de continuidad en el anillo de soldadura de los pernos A3 y A4, resultando indetectado el defecto en los A1 y A2.

En la Tabla 2 se comparan las cargas de rotura con las esperadas según la normativa anterior. Cabe destacar que de los tres fallos por soldadura que se produjeron, únicamente el A4 presentó una resistencia menor a la esperada analíticamente.



7. Ensayo de doblado de acuerdo al Structural Welding Code.

8. Resumen del análisis de superficies.

Tabla 2. Resultados del ensayo a tracción

Perno	Zona de rotura	P_u	N_{sa}/P_u	$N_{Rk,s}/P_u$
A1	fuste	48,1	0,73	0,67
A2	soldadura	43,9	0,81	0,73
A3	soldadura	36,5	0,97	0,88
A4	soldadura	18	1,96	1,77

3.6. Ensayo por cortante

Las piezas B, D, E y G se destinaron al ensayo de nudos mixtos bajo esfuerzos cortantes en continuación con la investigación de nuevas uniones pilar-forjado en edificación mediante pernos conectores (8, 9). Al intervenir muchos otros factores en este tipo de ensayos (interacción hormigón acero, influencia del rozamiento, concentración de tensiones, fracturas localizadas, etc.) únicamente se resumirá en este artículo que los pernos ensayados a cortante fallaron en su totalidad por el fuste con la rotura esperada y sin producir alteraciones en su funcionamiento mecánico por los posibles defectos de soldadura.

En el ensayo a cortante, al igual que en el A1 del ensayo de tracción, se produjo una rotura dúctil por el fuste, por lo que se impidió observar los defectos internos de soldadura.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez finalizados todos los ensayos se ha procedido a la catalogación de las superficies defectuosas de los pernos como se puede observar en la figura 8. Se han incluido las frecuencias propias medidas experimentalmente, el porcentaje de soldadura sin defecto obtenido mediante fotogrametría y el resultado obtenido por el ensayo destructivo correspondiente. En esta catalogación obviamente han quedado excluidos los pernos de los que no ha sido posible la obtención de su superficie de soldadura.

En este catálogo se observa una correlación directa entre la medición acústica realizada y la calidad de la soldadura. Lo que no se observa es una relación coherente entre la calidad de las soldaduras y los resultados obtenidos mediante los ensayos destructivos convencionales realizados. Como ejemplo de falta de relación se destacan los casos extremos de los resultados obtenidos en:

Probeta A1. Se obtiene un defecto de soldadura de falta de penetración resultando un 78,16% de superficie correctamente soldada. Pese a la grave reducción de superficie de soldadura supera el ensayo de tracción rompiendo por el fuste, escondiendo un defecto considerable.

Probeta C3. Se obtiene un defecto de soldadura mínimo resultando un 98,08% de superficie correctamente soldada. La ubicación de un defecto de dimensiones muy reducidas en el perímetro ha influido hasta el punto de no llegar a superar el ensayo de doblado.

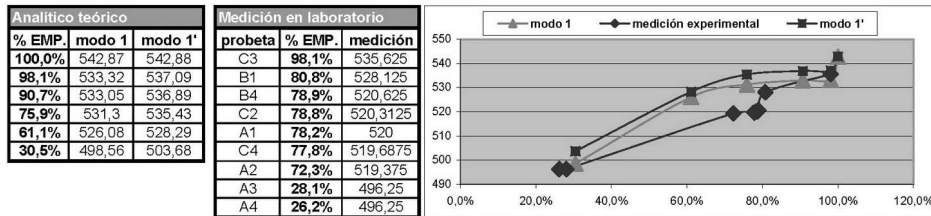
Estos resultados se explican con la estrecha relación que mantienen la ubicación del defecto con ciertos ensayos destructivos como puede ser el de doblado, llegando a ser más influyente la ubicación del defecto que su tamaño e incluso su geometría.

Según las mediciones acústicas parece que incluso la probeta E2, para la que se solicitó una correcta ejecución ha resultado con algún defecto interno de soldadura. A pesar de lo aparentemente alarmante, no sería de extrañar, puesto que es conocida la dificultad del correcto soldado en pernos de reducido diámetro, de ahí que esté normativamente prohibido el uso de pernos conectores menores de 16mm en estructuras de edificación.

La correlación directa que se intentaba demostrar en esta investigación entre los defectos de soldadura y la respuesta acústica producida se observa tanto en los cálculos teóricos analíticos como en los resultados obtenidos experimentalmente.

PIEZA A	perno A1	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		520		2,4958	3,1931	78,16	FALTA PENETRACIÓN	tracción ROTURA POR FUSTE
	perno A2	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		519,375		2,1447	2,9657	72,31	FALTA PENETRACIÓN, IMPUREZAS	tracción ROTURA POR SOLDADURA
PIEZA B	perno A3	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		496,25		0,7358	2,6195	28,08	FALTA PENETRACIÓN, IMPUREZAS	tracción ROTURA POR SOLDADURA
	perno A4	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		496,25		0,608	2,324	26,16	FALTA PENETRACIÓN, IMPUREZAS	tracción ROTURA POR SOLDADURA
PIEZA C	perno B1	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		528,125		2,4823	3,0732	80,77	FALTA PENETRACIÓN	golpeo OK
	perno B4	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		520,625		2,4241	3,0706	78,94	FALTA PENETRACIÓN	golpeo OK
PIEZA D	perno C2	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		520,3125		2,3948	3,0011	78,79	FALTA PENETRACIÓN	doblado ROMPE POR SOLDADURA
	perno C3	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		535,625		2,6463	2,6981	98,08	FALTA PENETRACIÓN	doblado ROMPE POR SOLDADURA
PIEZA E	perno C4	Hz	Imagen	Sup. OK	Sup. Total.	% sup. OK	Defecto	Ensayo
		519,6875		2,2931	2,9473	77,80	FALTA PENETRACIÓN	doblado ROMPE POR SOLDADURA

En la Figura 9 se comparan los resultados teóricos con los experimentales dejando a la vista una clara proximidad. Mediante la inspección acústica se puede prever el grado de imperfección en una soldadura que resulta aunque sin alcanzar a determinar la ubicación y geometría del defecto.



9

5. CONCLUSIONES

Como resultado de las investigaciones teóricas realizadas, mediante diferentes modelizaciones de pernos con defectos, se ha llegado a demostrar una reducción de la frecuencia de vibración en los pernos proporcional a la cantidad de defectos internos. Dicha reducción ha sido corroborada de modo experimental con diversas mediciones acústicas. Para poner de manifiesto la posibilidad de una robusta inspección "de oído" se destaca que dichas reducciones de frecuencia llegan a corresponder a una variación desde un tono comprendido entre el Do y el Do# de la quinta escala musical en soldaduras correctas hasta un tono muy próximo al Si de la cuarta escala en soldaduras gravemente afectadas por los defectos, para los diámetros y longitudes de los pernos ensayados. Esta variación es perfectamente captable por un oído experto ante su excitación mecánica, aunque lo realmente importante es que es objetivamente medible y registrable mediante un proceso de medición que emplea menos de cinco minutos, es absolutamente no destructivo ni invasivo y puede realizarse con instrumentos usuales en el mercado.

Se han comparado los resultados obtenidos en los ensayos que son habituales actualmente para pernos conectores con la calidad de las soldaduras. Como resultado se puede concluir de modo resumido que se encuentra una falta de relación Resultado-Calidad generalizada en todos ellos, a excepción de la inspección visual, por lo que no se consideran adecuados para la inspección de pernos conectores en los tipos de uniones presentados en este artículo. Cabe destacar:

- El ensayo de doblado, pese a tratarse del más utilizado a pie de obra en edificación, ha demostrado ser totalmente inseguro. Se trata de un método por el cual soldaduras gravemente defectuosas pueden superar el ensayo y en cambio soldaduras con leves defectos pueden no superarlo. Un claro ejemplo de ello es la

probeta C3, recogida en la Figura 7, que muestra un defecto de soldadura mínimo con un 98,08% de superficie correctamente soldada. La ubicación de un defecto de dimensiones muy reducidas en el perímetro ha influido hasta el punto de no llegar a superar el ensayo de doblado.

9. Frecuencias obtenidas teóricamente (modo 1 y 1') y de forma experimental.

- El ensayo de golpeo, además de los inconvenientes intrínsecos de su destructividad, ha demostrado ser inseguro y desaconsejado por su incapacidad de detección de defectos internos. Resulta eficaz para los defectos externos, pero éstos son sencillamente detectables con menor agresividad mediante la inspección visual.
- El ensayo de tracción demuestra ser, además de la obvia destructividad, ineficiente en la detección de defectos internos. Claro ejemplo de su ineficacia se puede observar en la probeta A1, donde se aprecia un defecto de soldadura de falta de penetración resultando sólo un 78,16% de superficie correctamente soldada. Esta probeta supera el ensayo de tracción al romper por el fuste, pese a la grave reducción de superficie de su soldadura.
- La inspección visual destaca entre los ensayos convencionales en pernos conectores ya que demuestra una alta efectividad de detección, aunque limitada a los errores externos. Por ello la inspección visual resulta insuficiente, ya que se ha observado que un gran porcentaje de los defectos habituales en pernos conectores (falta de penetración, porosidad, falta de penetración, impurezas, etc.) quedan ocultos en el interior de la soldadura. Por ello, aunque insuficiente, se ha considerado razonable plantear la inspección visual como método complementario al ensayo por inspección acústica propuesto. Junto con su alta efectividad para errores externos se presentan las ventajas de mínima agresividad y bajo coste.

Con la presente investigación se ha obtenido un método de inspección de soldaduras no destructivo y viable tanto en laboratorio como a "pie de obra". Dicho método ha partido del antiguo método rudimentario de comprobación de piezas mediante su golpeo y análisis del sonido producido mediante un "oído fino". A partir de él se han incorporado las herramientas tecnológicas actuales con las que se logra establecer un valor medible con la suficiente precisión,

se suprime la limitación al rango audible de frecuencias y se facilita la ejecución en obra. La correlación entre las diferencias observadas en las frecuencias obtenidas tanto de forma teórico-analítica como las obtenidas de forma experimental con el descenso en la calidad de la soldadura resultante hace del ensayo acústico un excelente indicador de la calidad de la soldadura, de mayor fiabilidad que los ensayos destructivos habituales, y que puede por tanto emplearse con ventaja frente a éstos para la aceptación o rechazo de las uniones con pernos conectores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores deseamos agradecer a APTA, en especial a Emilio García Alonso, la subvención y confianza depositada en CátedrAce-ro para el desarrollo el proyecto de investigación "uniones mixtas mediante pernos conectores" que ha hecho posible este trabajo. Se agradece al personal de la ETSAM de los laboratorios de Mecánica y Física Aplicada, especialmente a César Díaz Sanchidirán, por su ayuda y cooperación para el desarrollo de los ensayos experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) UNE-EN 970 (1997): "Examen no destructivo de soldaduras por fusión. Examen Visual".
- (2) Piotrowski, L.; Augustyniak, B.; Chmielewski, M.: "On the possibility of the application of magnetoacoustic emission intensity measurements for the diagnosis of thick-walled objects in the industrial environment", *Measurement Science and Technology*, 21, UK, 2010.
- (3) Hongping, G.; Duley, W.: "A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding", *IOP Science*, pp. 556–560 (1995).
- (4) Den Ouden, G.; Van Bohemen, M.; Hermans, J.; Richardson, M.: "A study of acoustic emission energy generated during bainite and martensite formation", *Journal of physics d. applied physics* (2002), 35: 1889-1894.
- (5) American Welding Society: "Structural welding code. steel", AWS D1.1/ D1.1M: Section 7. 2004.
- (6) ACI Committee 318: "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) Apendix D", American Concrete Institute, 2008.
- (7) Deutsches Institut für Bautechnik: "European Technical Approval. ETA-03/0041", 2008.
- (8) Aznar, A.; Hernando, J. I.; Ortiz, J.; Cervera, J.: "Conexión de forjados de hormigón a soportes metalicos", Resumen de comunicaciones, Congreso ACHE, 2008.
- (9) Aznar, A.; Cervera, J.; Ortiz, J.; Hernando, J. I.: "Conexión Investigación analítica y experimental de uniones mixtas en edificación mediante pernos conectores", Resumen de comunicaciones, Congreso ACHE, 2011.

* * *